مطالعهٔ ویژگی‌های قوس بحرانی در مصالح دانه‌ای با استفاده از دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه*

علی احمدی[۱] سید احسان سیدی حسینی‌نیا[۲]

چکیده *هدف این مقاله، بررسی آزمایشگاهی رخدادهای مرتبط با پدیدهٔ قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای با استفاده از دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه می‌باشد. بدین منظور، با تمرکز بر روی ویژگی‌های قوس پایدار در آستانهٔ انهدام و زمان پس از انهدام قوس‌زدگی، می‌توان به نتایج نوینی دست یافت. قوس بحرانی برای یک محیط دانه‌ای، آخرین قوس پایدار متناظر با دریچه‌ای است که عرض آن به‌ازای یک زاویهٔ بستر معین، دارای حداکثر مقدار ممکن است. حداکثر عرض دریچه برحسب زاویهٔ اصطکاک داخلی و زاویهٔ بستر مصالح دانه‌ای، حدودا ٤/٧ تا ٨/٧ برابر قطر متوسط ذرات مشاهده شده است. اگرچه عرض قوس بحرانی دارای مقدار بیشینهٔ ممکن است، اما ارتفاع قوس بحرانی نسبت به گام پیشین آزمون، نه تنها افزایش نمی‌یابد، بلکه از مقدار آن کاسته شده است. ضمنا، پس از انهدام قوس، مصالح دانه‌ای باقی مانده درون جعبه تقریبا به‌صورت متقارن در روی دو ریل افقی طرفین دریچه قرار می‌گیرند و آرایش هر یک، با تقریب بسیار خوبی نسبت به آرایش اولیهٔ پیش از انجام آزمایش، ثابت و بدون تغییر باقی می‌مانند.*

واژه‌های کلیدی مصالح دانه‌ای، دریچه، قوس، بحرانی، انهدام.

Study on the Features of Critical Arch in Granular Materials by the Developed Trapdoor Apparatus

A. Ahmadi E. Seyedi Hosseininia

Abstract *This paper experimentally discusses events being relevant to the arching effect in granular materials by the developed trapdoor apparatus. A focus on the features of stable arch at two moments when an arch is on the verge of collapse in addition to the time after the collapse. The critical arch for a granular medium is the last stable arch belonging to a trapdoor with maximum possible width at a particular base angle. The maximum trapdoor width is observed 4.7 to 8.67 times the average particles diameter depending on the internal friction angle and base angle values. The critical arch has the maximum width in proportion to previous run, whereas its height not only increases but will get smaller. After arch collapses, particles remained in the test box, are approximately located on the horizontal rails symmetrical. Besides, their arrangement remains almost constant compared to early one.*

Key Words Granular Materials, Trapdoor, Arch, Critical, Collapse.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۸/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۹٦/۹/۲۱ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموختهٔ مکانیک خاک و پی، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. Email: eseyedi@um.ac.ir

مقدمه

محیط دانـه‌ای را مـی‌تـوان مجموعـه‌ای از ذرات مجـزا دانست که در تماس با یکـدیگر قـرار دارنـد. مقاومـت برشی مصالح دانه‌ای کـه مطـابق معیـار کولمـب، عامـل چسبندگی در آنها صـفر اسـت، متـأثر از پـارامتر زاویـهٔ اصطکاک داخلی ذرات تشکیل‌دهندهٔ محیط می‌باشد. در شرایطی که در یک محیط دانـه‌ای بـا حـذف پـی‌درپـی ذرات، ساختاری پایدار ایجـاد شـود، انـدرکنش متقابـل ذرات با یکدیگر، آنها را از فروپاشی در برابر تنش‌هـای وارد از مصالح مجاور حفظ می‌کند [1]. از آنجـایی کـه در اکثر موارد مشاهده‌شده، شکل این سـاختار شـبیه بـه یک قوس یا کمان است، پژوهشگران نام قوس‌زدگـی را برای این پدیده برگزیده‌اند. قوس‌زدگی در یـک محـیط دانه‌ای همگن تحت بارگذاری همسـان بـا بسـیج شـدن مقاومت برشی ایجاد می‌شود [2] و سـبب شـکل‌گیـری قوسی پایدار می‌گردد که فشار وارد بر محیط دانـه‌ای را از نواحی نرم‌تر به مناطق سخت‌تر سازه منتقـل مـی‌کنـد [3]. به عبارت دیگر، اگر اجزای محیط که در آسـتانهٔ از دست دادن تعـادل اسـتاتیکی خـود هسـتند، از نـواحی متعادل پیرامون برای بقای ایستایی خـود بـه‌عنـوان یـک تکیه‌گاه استفاده کنند، در آنهـا میـل بـه پایـداری ایجـاد می‌شود و در این شرایط قوس‌زدگـی رخ مـی‌دهـد [4]. نخستین بار گو و ژو [3] به بررسی پدیدهٔ قـوس‌زدگـی به‌عنوان یک قوس پایدار در مصالح دانه‌ای به‌شکل یـک مسـ ئلهٔ سـطح آزاد پرداختـه‌انـد. اخیـرا نیـز مطالعـهٔ آزمایشگاهی احمدی و سیدی حسینی‌نیا [۵] با سـاخت دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه، قوس‌زدگی را در نمونه‌هایی از مصالح دانه‌ای در حالت کرنش مستوی مورد پژوهش قرار داده است. در مقالهٔ مذکور روابطی میان ابعاد قوس پایدار و عرض دریچه به‌ازای شتاب‌های ثقل مختلـف و پارامترهای مصالح دانه‌ای ارائه گردیده است.

قوس‌زدگی یکی از جامع‌ترین پدیـده‌هـای طبیعـی است کـه تحـت شـرایطی در هـر دو محـیط میـدانی و آزمایشگاهی برای مصالح ازجمله خاک اتفاق مـی‌افتـد. با این وجود، ماهیت پدیدهٔ قوس‌زدگی تاکنون به‌معنـای انتقال بار و ایجاد تغییرات فشار در محیط‌های مرتبط بـا سازه‌های مهندسی ژئوتکنیک مورد مطالعـه قـرار گرفتـه است. از آن جمله می‌توان بـه موضـوع انتقـال فشـار در خاک در تماس با دیوار نگهبان صلب [6]، دیـواره‌هـای سـاحلی [7]، تغییـرات ظرفیـت بـاربری شـالوده‌هـای چندگانه در خاک ماسه‌ای [8]، بررسی بازتوزیع تنش‌هـا در محدودهٔ حفاری‌شدهٔ تونل به‌کمک روش‌های عـددی [۹] و آزمایشـگاهی [10]، مطالعـهٔ مـوردی بـر روی قوس‌زدگی در خـاک بـالای تونـل حفرشـده در خـاک ماسه‌سنگ [11]، بررسی اثر قوس‌زدگی بر روی ظرفیت باربری پی‌های مرکب مسلح‌شده با لایه‌های ژئوسینتتیک در دو جهـت افقـی و قـائم [12]، قـوس‌زدگـی در شیب‌های خاک مسلح‌شده با شـمع [13] و خاکریزهـای مسلح‌شده با ستون‌های سنگی [14] اشاره نمود. به‌منظور پرهیـز از طـولانی شـدن ذکـر پیشـینهٔ پـژوهش‌هـای صورت‌گرفته، توصیه می‌شـود بـرای آشـنایی بیشـتر بـا پدیدهٔ قوس‌زدگی در مصـالح دانـه‌ای، مراجـع [15,16] مطالعه گردند.

نتایج نشان داده‌شده در اثر قبلـی نویسـندگان [۵]، حاصل از بررسی اثر قوس‌زدگی در محیط دانه‌ای قبل از انهدام قوس پایدار بر روی دریچه بوده است. هدف این نوشتار، تمرکز بر روی دو رخداد قابل تأمـل در آزمـون توسعه‌یافتهٔ دریچه است که یکی مربوط به آستانهٔ انهدام قوس پایدار است و دیگری پس از فروپاشی قـوس، در ساختار مصالح دانه‌ای ملاحظه گردیده اسـت. بـا انجـام آزمون‌های آزمایشگاهی به‌کمـک دسـتگاه توسـعه‌یافتـهٔ دریچه [۵] و بررسی دقیـق نتـایج، مـی‌تـوان بـه پاسـخ مناسبی درجهت توجیه تأثیرات پدیـدهٔ قـوس‌زدگـی در مصالح دانه‌ای دست یافت. نتایج به‌دست آمده می‌توانند در تحلیل رفتار ذرات یک محیط دانه‌ای حین خـروج از سیلوها و قیف‌های نگهداری، تغییرات تنش در مصـالح و همچنین ابعاد ایمن یک بازشوی پایـدار اسـتاتیکی در محیط غیرچسبنده بدون نیاز به مهار کاربرد داشته باشند.

محیط دانه‌ای آزمایش

مصالح دانه‌ای مصرفی در پژوهش کنونی، همان موارد استفاده‌شده در مرجع [۵] شامل مجموعهٔ سنگریزه (Rockfills) و گوی‌های پلاستیکی (Beads) با دو آرایش (Array) شل (Loose) و متراکم (Dense) هستند. مجموعه سنگریزه (شکل ۱-الف) ترکیبی از مصالح خشک درشت‌دانه و غیرچسبنده است که قطر متوسط ذرات (d_{50}) آن برابر ۰/۹ سانتی‌متر، زاویهٔ اصطکاک داخلی (ϕ) معادل ٤١/٣ درجه و چگالی (ρ) آن ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شده است. از سوی دیگر، گوی‌های پلاستیکی (شکل ۱-ب) مجموعه‌ای از دانه‌های هم‌اندازه با شکل هندسی کره و فاقد عامل چسبندگی هستند. درحقیقت این نوع مصالح، نمونه‌ای از یک محیط دانه‌ای همگن را شبیه‌سازی می‌کنند. قطر هر دانه از گوی‌های پلاستیکی دقیقا ۱/۲ سانتی‌متر است و از آنجا که کلیهٔ دانه‌ها یک‌اندازه هستند، قطر میانگین مجموعه با قطر هر دانه یکسان و برابر ۱/۲ سانتی‌متر است. با ایجاد دو چیدمان منظم در قرارگیری گوی‌ها می‌توان به دو الگوی تراکم دست یافت که از نظر درجهٔ تراکم، زاویهٔ اصطکاک داخلی و چگالی با یکدیگر متفاوت هستند. آرایش شل (شکل ۲-الف) و آرایش متراکم (شکل ۲-ب) نام‌هایی هستند که برای هر الگو انتخاب شده‌اند [۵] و در هر گام از انجام آزمون قابل تولید می‌باشند. این ویژگی سبب می‌شود که در هر گام آزمایش، آرایش شل یا آرایش متراکم گوی‌ها با گام دیگر کاملا یکسان باشد و مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده امکان‌پذیر گردد. چگالی گوی‌های پلاستیکی در آرایش شل، ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و زاویهٔ اصطکاک داخلی آنها ۳۰/۷ درجه اندازه‌گیری شده است. گوی‌های پلاستیکی در آرایش متراکم دارای چگالی به مقدار ۱/۰٤ گرم بر سانتی‌متر مکعب و زاویهٔ اصطکاک داخلی ۳۷/٤ درجه هستند. زاویهٔ اصطکاک مصالح با اندازه‌گیری زاویهٔ ریپوز (Angle of Repose) هر یک از آنها انجام شده است. از آنجایی که برای مصالح دانه‌ای که در معرض جریان دانه‌ای (Granular Flow) قرار می‌گیرند، زاویهٔ اصطکاک داخلی آنها در بسیج‌شدگی مقاومت برشی در حالت بحرانی (Critical State) واقع می‌شود و براساس معیار کولمب، زاویهٔ اصطکاک داخلی آنها برابر ϕ_{cs} است که این مقدار معادل زاویهٔ ریپوز آن مصالح می‌باشد. برای محاسبهٔ زاویهٔ ریپوز نیز چند روش وجود دارد که در این پژوهش از روشی مشابه روش قیف در استاندارد ASTM C 1444-00 استفاده شده است. نظیر این کار در محاسبهٔ زاویهٔ اصطکاک داخلی در مطالعهٔ گو و ژو [3] نیز انجام شده است.



الف) مجموعهٔ سنگریزه



ب) گوی‌های پلاستیکی

شکل ۱ مصالح دانه‌ای مصرفی

توجه شود که الزامی در استفاده از گوی‌های شیشه‌ای در مدل‌سازی وجود نداشته است. هدف مقالهٔ حاضر در استفاده از گوی‌های پلاستیکی فقط ساختن یک محیط دانه‌ای با ذرات یک‌اندازه بوده و جنس یا زبری سطح دانه‌ها در تشکیل قوس درنظر گرفته نشده است. از طرفی هدف دیگر، مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش بر روی گوی‌های پلاستیکی با گوی‌های شیشه‌ای و سایر مصالح دانه‌ای بوده است. مشابه این کار در مطالعهٔ گو و ژو [3] نیز انجام شده است و با

مراجعه به آن مقاله می‌توان مشاهده نمود که در کنار گوی‌های شیشه‌ای یک‌اندازه، از ذرات یک‌اندازهٔ ZrO_2 (غیرشیشه‌ای) نیز استفاده شده است.



الف) آرایش شل



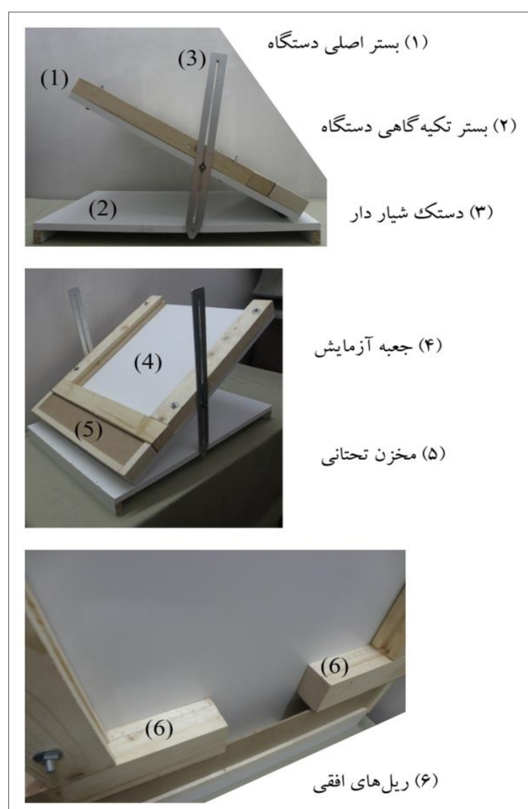
ب) آرایش متراکم

شکل ۲ نحوهٔ چیدمان آرایش‌های شل و متراکم برای گوی‌های پلاستیکی

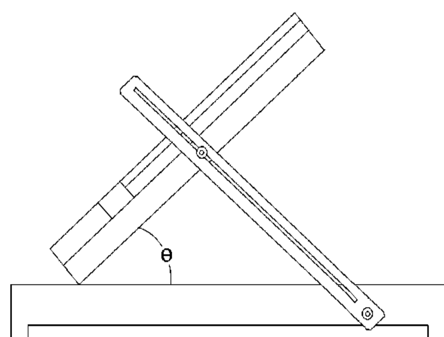
روش انجام آزمایش

در مرجع [۵] در رابطه با ساختار دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه، کاربرد آن در شناخت پدیدهٔ قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای و نیز روش انجام آزمون، اطلاعات مناسب و کاملی ارائه شده است. با این حال، در این بخش توضیحی اجمالی پیرامون دستگاه مذکور و چگونگی انجام آزمایش ارائه می‌شود.

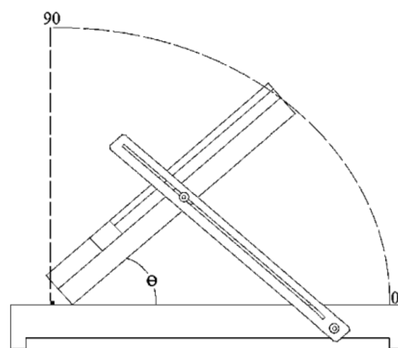
دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه نمونه‌ای ترکیبی و اصلاح‌شده از دستگاه ترزاقی [۵] و دستگاه گو و ژو [3] است که بخش‌های اصلی آن مطابق شکل (۳) شامل «بستر اصلی متحرک، جعبهٔ آزمایش، بستر تکیه‌گاهی، دستک‌های شیاردار، دو ریل افقی مدرج متحرک و یک مخزن تحتانی برای ذخیرهٔ مصالح تخلیه‌شده می‌باشد. فرض آزمایش دریچه این است که شرایط کرنش مستوی برای محیط دانه‌ای برقرار گردد. بدین منظور، ضخامت درونی جعبهٔ آزمایش طوری تنظیم می‌شود که مصالح فقط در یک لایه درون جعبه قرار گیرند. از طرفی، مطابق شکل (٤)، بستر اصلی دستگاه به‌عنوان یک سطح شیب‌دار نسبت به راستای افق زاویه‌ای به‌اندازهٔ θ می‌سازد. به‌منظور اعمال مقادیر متفاوت شتاب ثقل مؤثر به ذرات، این بستر می‌تواند مطابق شکل (۵)، بر روی مقادیر صفر تا ۹۰ درجه نسبت به افق ثابت شود.



شکل ۳ بخش‌های اصلی دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه



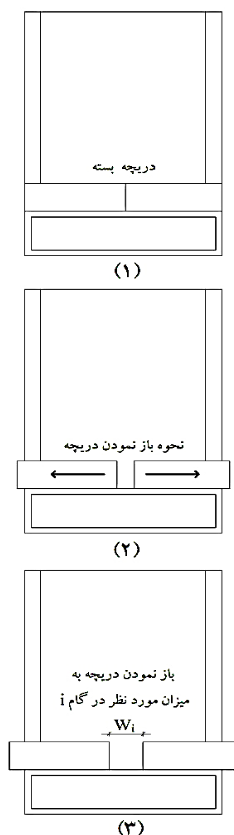
شکل ٤ زاویهٔ بستر اصلی دستگاه (θ) نسبت به افق



شکل ۵ دامنهٔ حرکت بستر اصلی دستگاه (صفر تا ۹۰ درجه)

برای انجام یک گام آزمون، نخست ضخامت درونی جعبه تنظیم و سپس بستر اصلی دستگاه بر روی زاویهٔ (θ) مورد نظر بسته می‌شود. در ادامه، دو ریل افقی به‌صورت کاملا متقارن و به‌مقدار مورد نیاز بسته به شمارهٔ گام (متغیر بین صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) از یکدیگر دور می‌شوند (شکل ٦). سپس در فضای ایجادشده یک قطعه پلاستیکی فشرده مکعب مستطیلی شکل قرار می‌گیرد (که این قطعه، هم درپوش دریچهٔ آزمایش است و هم از تخلیهٔ مصالح به درون مخزن تحتانی پیش از شروع گام جلوگیری می‌کند). پس از آن، مصالح دانه‌ای وارد جعبه می‌گردند و درنهایت، درپوش به‌طرف پایین منتقل و به‌طور کامل برداشته می‌شود. در هر گام، یک قوس پایدار استاتیکی در محیط ایجاد می‌شود. شکل (۷) مراحل تدریجی انجام یک گام آزمون را نشان می‌دهد. در اینجا منظور از قوس پایدار، مجموعه‌ای از ذرات محیط است که با کنار یکدیگر قرارگرفتن آنها، شکل تقریبی یک کمان یا قوس تداعی می‌شود. شکل (۸) نمونه‌ای از تصاویر مربوط به قوس‌زدگی را ارائه می‌نماید. لازم به‌ذکر است که دررابطه با قوس‌زدگی، مرز بیرونی قوس پایدار مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۹). بر این اساس، اطلاعات مربوط به هر قوس شامل عرض و ارتفاع قوس، عرض دریچهٔ متناظر باتوجه به موقعیت دستگاه مختصات دکارتی و زاویهٔ بستر اصلی برای هر نوع مصالح دانه‌ای به‌نحوی که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، قرائت و ثبت می‌گردند. با ثبت داده‌ها گام مذکور به پایان می‌رسد.

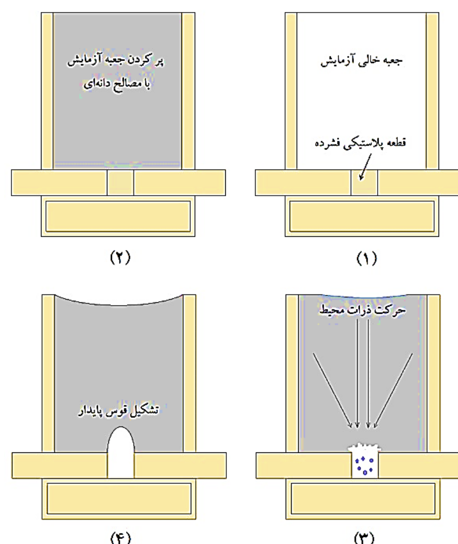
برای انجام گام بعد، ۰/۲ سانتی‌متر به عرض دریچه (مربوط به گام قبل) افزوده می‌شود و سپس مراحل فوق دوباره اجرا می‌گردند. باید دانست که فرایند آزمون تا لحظه‌ای ادامه می‌یابد که همچنان قوس پایدار بر روی دریچه ایجاد گردد. بنابراین، زمانی که دیگر قوس‌زدگی در ذرات محیط مشاهده نشود، آزمون متوقف خواهد شد و گام پیش از انهدام قوس، به‌عنوان آخرین گام آزمون خواهد بود [۵].



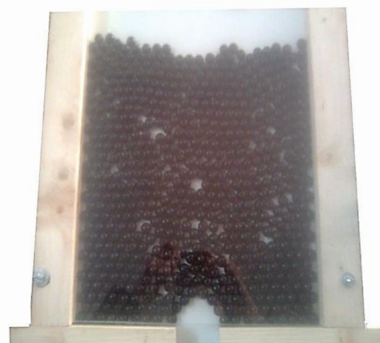
شکل ٦ راستای حرکت ریل‌های افقی و نمایش عرض دریچه در هر گام آزمون

با اجرای ۲۷٦ گام آزمون بر روی گوی‌های پلاستیکی در آرایش شل (به‌ازای ده زاویهٔ بستر شامل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ٦۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق)، ۳۱٦ گام آزمون بر روی گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم (به‌ازای ده زاویهٔ بستر شامل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ٦۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق) و ۱۴۲ گام آزمایش بر روی سنگریزه‌ها (به‌ازای چهار زاویهٔ بستر شامل ۱۰، ۴۰، ۷۰ و ۹۰ درجه

نسبت به افق) و در مجموع ۷۳٤ گام آزمایش، اطلاعات مشاهده‌شده مربوط به قوس‌زدگی ثبت شده‌اند [٥].

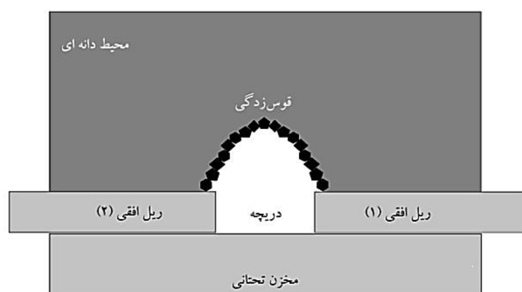


شکل ۷ مراحل طی‌شده در انجام یک گام آزمون: ۱) تنظیم عرض دریچه و قرار دادن قطعهٔ پلاستیکی فشرده (آکاستیو) در محل دریچه، ۲) وارد نمودن مصالح دانه‌ای در جعبهٔ آزمایش، ۳) برداشتن قطعهٔ پلاستیکی (دریچه)، ٤) ثبت اطلاعات مربوط به قوس‌زدگی پس از تشکیل قوس پایدار

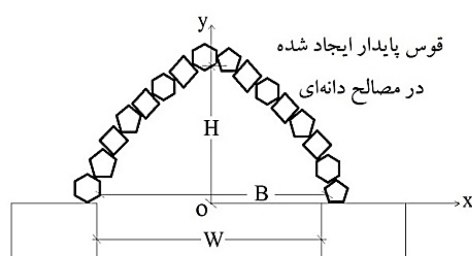




شکل ۸ نمونه‌ای از تصاویر قوس‌زدگی در مصالح



شکل ۹ نمایش مرز ذرات شرکت‌کننده در قوس‌زدگی



شکل ۱۰ نحوهٔ اندازه‌گیری اطلاعات مربوط به قوس‌زدگی

نتایج و تفسیر

براساس داده‌های خام آزمایشگاهی، نتایج متعددی قابل استخراج و بررسی هستند که با دقت در روند وقوع هر یک، امکان تفسیر دلیل هر کدام از آنها وجود خواهد داشت. مشاهدات تجربی نشان داده‌اند که با افزایش عرض دریچه، به مقدار عرض قوس افزوده می‌گردد. همچنین، افزایش عرض دریچه سبب افزایش در ارتفاع قوس گردیده‌است [٥]. این نتایج و سایر موارد مستخرج از پژوهش [٥] برای قوس‌زدگی تا مرحلهٔ «قبل از انهدام قوس پایدار» در مصالح دانه‌ای بیان گردیده‌اند. با این وجود، می‌توان با تمرکز بر روی ویژگی‌های قوس پایدار در لحظهٔ «آستانهٔ انهدام» و رخدادهای «پس از انهدام» به نتایج نوین قابل توجهی دست یافت.

باید توجه داشت که چگالی به نوعی نمایش‌دهندهٔ تراکم مصالح و ابعاد ذرات یک پارامتر هندسی از مجموعه محیط دانه‌ای است. در این مقاله، برای مطالعهٔ شکل هندسی قوس پایدار، تأثیر وزن مخصوص یا

درجهٔ تراکم مصالح با مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از گوی‌های پلاستیکی در دو آرایش متراکم و شل که هر دو دارای ابعاد ذرات (d_{50}) یکسان بوده‌اند، بررسی شده است. از سوی دیگر، برای سنجش میزان تأثیر زاویهٔ اصطکاک داخلی نسبت به اندازهٔ دانه‌ها بر روی ابعاد قوس، از مقایسهٔ نتایج حاصل از سنگریزه‌ها (d_{50} کوچک‌تر) با گوی‌های پلاستیکی در حالت متراکم (d_{50} بزرگ‌تر) استفاده شده است. تأثیر این پارامترها در عرض بحرانی دریچه براساس قطر متوسط ذرات محیط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

آستانهٔ انهدام قوس پایدار

منظور از آستانهٔ انهدام قوس، آخرین گام آزمون است. به عبارت دیگر، آستانهٔ انهدام لحظه‌ای است که در آن قوس پایدار نهایی بر روی دریچه تشکیل می‌شود و پس از آن با کوچک‌ترین افزایش در اندازهٔ عرض دریچه، دیگر هیچ‌گونه قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای رخ نخواهد داد. بررسی‌های انجام شده حاصل از انجام آزمون‌های آزمایشگاهی دریچه نشان می‌دهند که مدت زمان رسیدن به لحظهٔ آستانهٔ انهدام قوس در مصالح دانه‌ای آزمایش‌شده متفاوت است و به عوامل گوناگونی وابسته است که یافتن دلیل آنها نیازمند بحث و تفسیر زیادی می‌باشد. در ادامه به بررسی جامعی پیرامون این موضوع پرداخته می‌شود.

تعریف قوس بحرانی. براساس تعریف نوشتار حاضر، قوس بحرانی (Critical arch) قوس پایدار استاتیکی مربوط به آخرین گام آزمون است. این بدان معنا است که در این حالت، دریچه دارای حداکثر عرض ممکن (نسبت به گام‌های قبلی) خواهد بود. به بیان دیگر، اگر عرض دریچه از عرض دریچهٔ متناظر با قوس بحرانی بیشتر شود، قابلیت قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای از بین خواهد رفت. بنابراین، قوس بحرانی در واقع نشان‌دهندهٔ ظرفیت نهایی پدیدهٔ قوس‌زدگی برای انتقال فشار استاتیکی محیط دانه‌ای اطراف قوس به دو تکیه‌گاه آن است. از این‌رو، آشنایی با ویژگی‌های ظاهری و مکانیکی قوس بحرانی و تفسیر سازوکار تشکیل آن، کمک شایانی به درک جامع‌تر اثر قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای خواهد نمود. شکل (۱۱) نمونه‌ای از تصویر قوس‌های بحرانی در مصالح دانه‌ای را نشان می‌دهد.



الف) گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل



ب) گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم



پ) مجموعه سنگریزه

شکل ۱۱ نمونه‌ای از قوس‌های بحرانی

ویژگی‌های قوس بحرانی. بدیهی است در آخرین گام آزمون، متناظر با حداکثر عرض دریچه، عرض قوس نیز دارای مقدار بیشینهٔ خود می‌باشد. از این‌رو، انتظار

می‌رود قوس تشکیل‌شده، ساختاری کاملا حساس نسبت به تنش‌های درونی (موجود در مصالح) یا تنش‌های القایی خارجی (نظیر فشار ناشی از ارتعاشات یا ضربه‌های کوچک احتمالی به جعبه) باشد. بنابراین، باید تا حد امکان، تمامی مراحل اجرای آزمون با کمال دقت و آرامش و با پرهیز از اعمال هرگونه ارتعاش و لرزش به دستگاه آزمایش انجام شوند.

توجه به این نکته ضروری است که اگر در یک گام از آزمایش قوس‌زدگی مشاهده نشود، بدین معنی نیست که آزمون خاتمه پیدا کرده است؛ بلکه لازم است برای کنترل نتایج، ابتدا همان گام آزمون دوباره تکرار شود و سپس حداقل سه گام بعدی اجرا گردد. چنانچه در طول این سه مرحله قوس پایدار تشکیل نشد، آنگاه انجام آزمون متوقف می‌شود. در این حالت، عرض دریچهٔ گام پیشین (قبل از سه گام کنترلی) نمایانگر عرض دریچهٔ بحرانی است و بنابراین قوس تشکیل‌شده هم بحرانی بوده است. اما اگر در یکی از گام‌های سه‌گانهٔ کنترل، یک قوس پایدار بر روی دریچه تشکیل شد، باید همهٔ گام‌های آزمون تکرار شوند، زیرا احتمالا در یکی از شرایط آزمایش مانند نحوهٔ قرارگیری مصالح در جعبه و یا محکم کردن بستر اشکالی وجود داشته است که با انجام کنترل‌ها رفع شده‌اند. از طرفی، بروز خطاهای انسانی در ایجاد ارتعاش‌های کوچک ناشی از لرزش دست یا اعمال ضربه به جعبهٔ آزمایش نیز ممکن است سبب ایجاد مشکل در فرایند تشکیل قوس پایدار گردیده باشند. در این حالت، ضروری است تا با فراهم نمودن شرایط نسبتا ایده‌آل، به اجرای آزمون پرداخت.

در آزمایش‌های صورت‌گرفته در این مطالعه، پس از عدم تشکیل قوس به‌ازای یک عرض دریچهٔ معین، برای اطمینان بیشتر به‌جای سه گام کنترل، چهار گام دیگر آزمون انجام گردیده، اما در هیچ‌یک از آنها قوس‌زدگی مشاهده نشده است. به عبارت دیگر، همهٔ گام‌های آزمایش در صحت و دقت کامل صورت گرفته‌اند.

مشاهدات حاکی از آن هستند که اگرچه در آخرین گام آزمون یا همان لحظهٔ تشکیل قوس بحرانی، عرض دریچه و عرض قوس دارای مقادیر بیشینهٔ خود هستند، اما ارتفاع قوس بحرانی، بیشینه نیست بلکه نسبت به گام قبل مقداری افت نموده است. این پدیده در کار پژوهشی گو و ژو [3] مشاهده نشده است. البته دلیل احتمالی آن، این است که در دستگاه آزمون گو و ژو [3] تنها از چند دریچه با عرض ثابت استفاده شده، درحالی که عرض دریچه در دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه متغیر است.

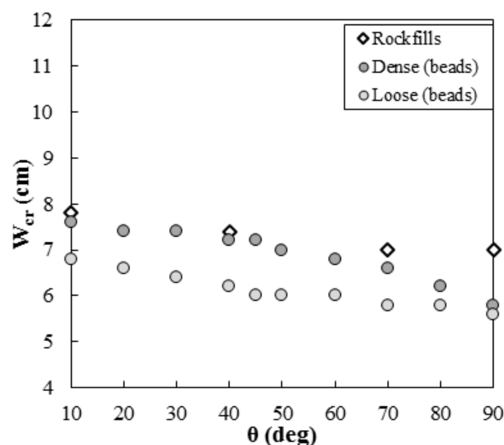
از آنجایی که در آخرین گام آزمون، عرض دریچه حداکثر مقدار خود را دارد، نرخ خروج مصالح دانه‌ای از دریچه نیز به بالاترین مقدار ممکن افزایش می‌یابد. این پدیده سبب بروز دو رخداد هم‌زمان خواهد شد؛ اول این‌که، قفل‌شدگی دانه‌ها در یکدیگر سریع‌تر و بسیج شدن تنش‌های برشی بین ذرات محیط در فاصلهٔ قائم کمتری نسبت به دریچه انجام می‌شود، بنابراین تاج قوس هم در همان تراز واقع می‌گردد. دوم این‌که، به‌منظور ثابت ماندن حجم فضای خالی موجود زیر سطح قوس ایجادشده، قوس مجبور است از ارتفاع خود بکاهد. زیرا همواره حجم مصالح تخلیه شده با مجموع حجم فضای خالی زیر قوس و حجم حاصل از نشست سطح رویه مصالح فوقانی برابر است. لازم به‌ذکر است که این مسئله، یافته‌ای جدید در رابطه با پدیدهٔ قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای می‌باشد.

با مشاهده شکل (۱۲) باید بیان نمود که به‌طور کلی برای تمامی مصالح دانه‌ای استفاده شده در این پژوهش، هرچه زاویهٔ بستر اصلی دستگاه بیشتر باشد، حداکثر عرض دریچه یا همان عرض بحرانی دریچه (W_{cr}) برای ایجاد قوس‌زدگی کمتر شده است. به عبارت دیگر، با افزایش شیب قرارگیری ذرات محیط دانه‌ای نسبت به افق، عرض بحرانی دریچه کوچک‌تر خواهد بود. مقایسهٔ داده‌ها با یکدیگر نشان می‌دهند که به‌ازای یک زاویهٔ بستر ثابت دل‌خواه در بازهٔ ۱۰ تا ۹۰ درجه نسبت به افق، همواره خواهیم داشت:

$$W_{cr\,(Rockfills)} > W_{cr\,(Beads-Dense)} > W_{cr\,(Beads-Loose)}$$

این مسئله باتوجه به پارامتر زاویهٔ اصطکاک داخلی

مصالح قابل توجیه است. از آنجایی که با افزایش مقـدار زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای، قفل‌شدگی ذرات در یکدیگر و بسیج‌شدگی تنش‌هـای برشـی و درنتیجـه قابلیت قوس‌زدگی و انتقال بار بیشتر مـی‌شـود، عـرض دریچه متناظر با قوس بحرانی نیز آزادی بیشـتری بـرای رسیدن به مقدار حداکثر بیشتر دارد. به‌عنـوان مثـال، بـر روی زاویهٔ بسـتر ۱۰ درجـه، باتوجـه بـه انـدازهٔ زاویـهٔ اصطکاک داخلی ٤١/٣، ٣٧/٤ و ٣٠/٧ درجـه بـه‌ترتیـب برای سنگریزه‌ها، گوی‌های پلاستیکی با آرایـش متـراکم و آرایش شل، عرض بحرانی دریچه متنـاظر بـا مصـالح دانه‌ای نام‌برده به‌ترتیب برابر ۷/۸، ۷/٦ و ٦/۸ سانتی‌متـر مشـاهده شـده اسـت. عـلاوه بـر تـأثیر مسـتقیم زاویـهٔ اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای بر روی W_{cr} باید توجـه داشت که با وجود تفـاوت در مقـدار زاویـهٔ اصـطکاک داخلی مجموعهٔ سـنگریزه (٤١/٣ درجـه) و گـوی‌هـای پلاسـتیکی بـا آرایـش متـراکم (٣٧/٤ درجـه)، نمـودار تغییرات عرض بحرانـی دریچـه برحسـب زاویـهٔ بسـتر مصـالح دانـه‌ای مربـوط بـه سـنگریزه‌هـا و گـوی‌هـای پلاستیکی با آرایش متـراکم تقریبـا بـر یکـدیگر منطبـق هستند. دلیل این واقعـه را بایـد بـه تـأثیر قطـر متوسـط ذرات محـیط ارتبـاط داد. هرچـه قطـر متوسـط ذرات بزرگ‌تر باشد، بر روی یـک زاویـهٔ بسـتر معـین، ذرات کمتر دچار تغییرمکان‌هـای دورانـی و انتقـالی در حـین تخلیه می‌شوند و درنتیجه، دست‌یابی دریچه بـه عـرض بیشتر محتمل‌تر خواهد شد. به‌عنوان مثال، بر روی زاویهٔ بستر ۱۰ درجه نسبت بـه افـق، اگـر چـه مقـدار زاویـهٔ اصـطکاک داخلـی سـنگریزه (٤١/٣ درجـه) نسـبت بـه گوی‌های پلاسـتیکی بـا آرایـش متـراکم (٣٧/٤ درجـه) بزرگتر است، اما از آنجایی که قطر متوسط سـنگریزه‌هـا (۰/۹ سانتی‌متر) از گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم (۱/۲ سانتی‌متر) کوچک‌تر است، همین امر باعث کاهش عرض بحرانی دریچه در مجموعهٔ سـنگریزه نسـبت بـه گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم گردیـده تـا جـایی که منجر به مرز انطباق دو نمودار بر یکدیگر شده است. بنـابراین، بایـد اینچنـین نتیجـه‌گیـری نمـود کـه زاویـهٔ اصطکاک داخلی و قطـر متوسـط ذرات مصـالح دانـه‌ای به‌طور هم‌زمان دارای اثر مستقیم بر روی عرض بحرانی دریچه هستند، گرچه می‌توان اثر زاویهٔ اصطکاک داخلی را تا حدودی بیشتر از اثر قطر متوسط دانه‌ها دانست.

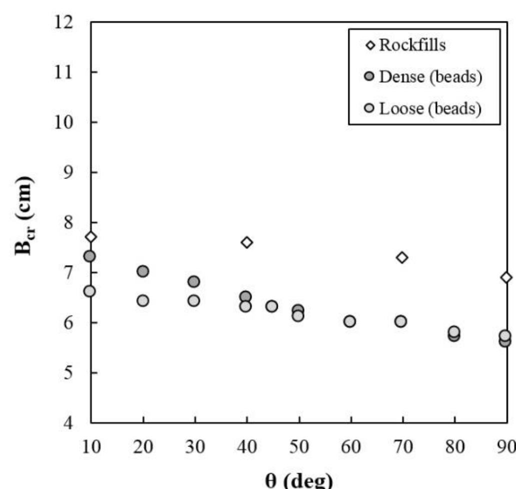


شکل ۱۲ عرض بحرانی (حداکثر) دریچه به‌ازای زاویه‌های بستر

شکل (۱۳) نشان می‌دهد که با افزایش زاویهٔ بسـتر اصلی دستگاه، عرض بحرانی قوس (B_{cr}) کـاهش یافتـه است. از طرف دیگر، به‌ازای کلیهٔ مقادیر زاویهٔ بسـتر (از ۱۰ تا ۹۰ درجه)، عرض قوس بحرانی تشـکیل‌شـده در سنگریزه‌ها بزرگ‌تر از گوی‌هـای پلاسـتیکی در هـر دو آرایش است. بـه‌عنـوان نمونـه، عـرض قـوس بحرانـی ایجادشده در سنگریزه‌ها، گوی‌های پلاستیکی با آرایـش متراکم و گوی‌های پلاستیکی بـا آرایـش شـل، بـر روی زاویـــهٔ بســـتر ۱۰ درجـــه بـــه‌ترتیـــب ۷/٦، ٦/٥ و ٦/٣ سانتی‌متر مشاهده گردیده است.

با این حال، عرض قوس بحرانـی بـرای گـوی‌هـا اندکی متفاوت اسـت. در بـازهٔ ۱۰ تـا ٥٠ درجـه زاویـهٔ بستر، عرض قوس بحرانی ایجادشده در آرایش متـراکم بیشتر از آرایش شل است، اما در بازهٔ ٥٠ تـا ۹۰ درجـه، قوس بحرانـی بـرای هـر دو آرایـش تقریبـا بـا عـرض یکسانی پدیدار گردیده است. به عبارت دیگر، با وجـود تفاوت در زاویهٔ اصطکاک داخلی گوی‌هـای پلاسـتیکی با آرایش متـراکم (٣٧/٤ درجـه) و آرایـش شـل (٣٠/٧ درجه)، به‌ازای مقادیر مختلف زاویهٔ بستر در بازهٔ ٥٠ تـا ۹۰ درجه، نمودار تغییرات عرض بحرانـی قـوس بـرای

گوی‌های پلاستیکی در هر دو آرایش، با تقریب خوبی بر یکدیگر منطبق هستند. از مجموع موارد ذکرشده نتیجه گرفته می‌شود که برای هر نوع مصالح دانه‌ای در بازهٔ دل‌خواه بین ۱۰ تا ۹۰ درجه نسبت به افق، پارامتر زاویهٔ اصطکاک داخلی محیط در عرض قوس بحرانی دارای بیشترین تأثیر است. برای یک محیط دانه‌ای همگن (دارای ذرات هم‌اندازه) نیز در حالتی که زاویهٔ بستر در بازهٔ ۱۰ تا ۵۰ درجه نسبت به افق واقع شود، پارامتر زاویهٔ اصطکاک داخلی محیط در عرض قوس بحرانی بیشترین تأثیر را دارد. اما در بازهٔ ۵۰ تا ۹۰ درجه که شتاب ثقل اثر بیشتری در حرکت رو به پایین مصالح بر روی بستر شیب‌دار به نسبت دامنهٔ ۱۰ تا ۵۰ درجه دارد، نقش انداز قطر دانه‌های تشکیل‌دهندهٔ محیط در قفل‌شدگی ذرات و به‌تبع آن اندازهٔ عرض بحرانی از پارامتر زاویهٔ اصطکاک داخلی پررنگ‌تر است.

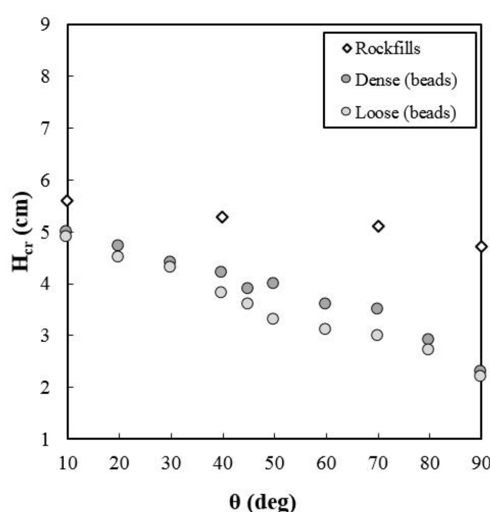


شکل ۱۳ عرض بحرانی (حداکثر) قوس به‌ازای زاویه‌های بستر

شکل (۱٤) نمودار تغییرات ارتفاع قوس بحرانی به‌ازای زاویه‌های مختلف بستر را نمایش می-دهد. با مراجعه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش زاویهٔ بستر مصالح دانه‌ای، از ارتفاع بحرانی قوس (H_{cr}) کاسته شده است. همچنین با انجام آزمایش بر روی مصالح به‌ازای یک زاویهٔ بستر ثابت، ارتفاع قوس بحرانی در سنگریزه‌ها بزرگ‌تر از گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم می‌باشد و ارتفاع قوس بحرانی در گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم تقریبا بزرگ‌تر از گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل است. به‌عبارت دیگر، در کلیه زوایای قرارگیری بستر نسبت به افق داریم:

$$H_{cr\,(Rockfills)} > H_{cr\,(Beads-Dense)} > H_{cr\,(Beads-Loose)}$$

به‌عنوان مثال، در حالتی که بستر دستگاه با راستای افق زاویهٔ قائم می‌سازد، ارتفاع قوس بحرانی تشکیل‌شده بر روی دریچه در سنگریزه‌ها، گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم و شل به‌ترتیب برابر ٤/۷، ۲/۳ و ۲/۲ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ١٤ ارتفاع بحرانی قوس به‌ازای زاویه‌های بستر

مطابق مشاهدات انجام‌شده در شکل‌های (۱۲)، (۱۳) و (١٤) چنین استنباط می‌شود که در آستانهٔ انهدام قوس پایدار، ابعاد قوس و عرض دریچه دارای رابطهٔ مستقیم با پارامتر زاویهٔ اصطکاک داخلی و قطر متوسط مصالح هستند. مقدار زاویهٔ اصطکاک داخلی با افزایش مقدار زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای، بسیج‌شدگی مقاومت برشی بین ذرات محیط و درنتیجه قابلیت قوس‌زدگی بیشتر می‌شود و همین امر سبب

افزایش ابعاد قوس و عرض دریچهٔ متناظر می‌گردد. این بدان معنی است که عرض و ارتفاع قوس بحرانی هم زیادتر می‌شود. اما زاویهٔ قرارگیری بستر مصالح دانه‌ای نسبت به افق تأثیر عکس بر روی ابعاد قوس و عرض دریچه دارد. با افزایش زاویهٔ قرارگیری بستر محیط نسبت به افق، «اثر شتاب ثقل» بر روی مجموعه مصالح دانه‌ای بیشتر می‌شود. نخست، این امر سبب می‌شود که دبی خروج مصالح دانه‌ای از دریچه زیادتر شود. بنابراین، به دریچه اجازهٔ کمتری برای باز شدن تا حد رسیدن به حداکثر مقدار درمقایسه با یک زاویهٔ بستر کوچک‌تر داده خواهد شد. از این‌رو، حداکثر عرض دریچه یا همان عرض بحرانی دریچه کمتر است و به‌تبع آن عرض قوس بحرانی هم کوچک‌تر خواهد بود. دوم این‌که، با افزایش اثر شتاب گرانش، به قوس بحرانی ایجادشده فشار سربار بیشتری اعمال می‌شود. در این حالت اگر قوس به‌صورت یک تیر خمیده تحت بارگذاری گسترده از محیط پیرامونی در نظر گرفته شود، تغییرمکان رو به پایین (خیز) بیشتری پیدا می‌کند و به‌عبارت دیگر، کاهش ارتفاع می‌یابد.

باید توجه نمود که تمرکز ویژه بر روی مفهوم قوس بحرانی، برای نخستین بار در پژوهش حاضر انجام شده است.

پیش‌بینی حداکثر عرض دریچه یک مخزن مرتبط با مصالح دانه‌ای باتوجه به ویژگی‌های محیط از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر قطر متوسط مجموعه به‌عنوان یک پارامتر مشخص از مصالح دانه‌ای درنظر گرفته شود، می‌توان مطابق شکل (۱۵) نسبت حداکثر عرض دریچه (عرض دریچهٔ بحرانی) را به قطر متوسط اجزای محیط محاسبه نمود. با مراجعه به شکل مذکور، رابطهٔ (۱) قابل بیان است:

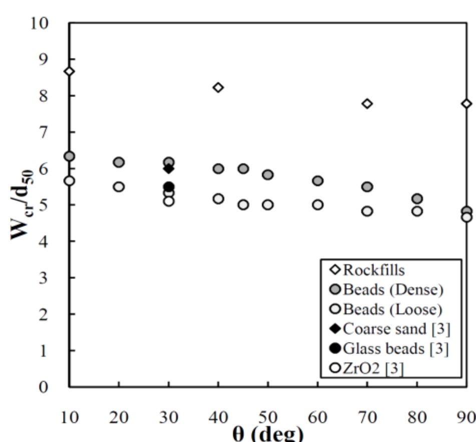
$$4.7 \le \frac{W_{cr}}{d_{50}} \le 8.67 \quad (۱)$$

در این رابطه:

W_{cr}: عرض دریچهٔ بحرانی (حداکثر عرض دریچه).

d_{50}: قطر متوسط ذرات محیط دانه‌ای.

مشاهده می‌شود کمترین عرض بحرانی دریچه، ۴/۷ برابر قطر متوسط ذرات و مربوط به یک قوس پایدار در آستانهٔ انهدام است که در گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل و در حالت قرارگیری بستر بر روی زاویه ۹۰ درجه نسبت به افق تشکیل شده است. حال آن‌که، بزرگ‌ترین عرض بحرانی دریچه، ۸/۶۷ برابر قطر متوسط ذرات و متعلق به شرایط تشکیل یک قوس پایدار در آستانهٔ انهدام است که در مجموعهٔ سنگریزه بر روی زاویهٔ بستر به‌اندازهٔ ۱۰ درجه ظاهر شده است.



شکل ۱۵ نسبت عرض بحرانی (حداکثر) دریچه به قطر متوسط ذرات به‌ازای زاویه‌های بستر

البته در ارائهٔ رابطهٔ (۱) باید توجه داشت که هدف این مقاله، بررسی تأثیر شکل ذرات و تیزگوشگی آنها به‌عنوان متغیر مستقل نبوده است و تأثیر این عوامل با ارتباط دادن اثر آنها بر روی پارامترهای زاویهٔ اصطکاک داخلی، وزن مخصوص (درجهٔ تراکم)، قطر متوسط ذرات و درنتیجه نقش آنها در شکل هندسی قوس ایجادشده مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.

نتایج مطالعهٔ آزمایشگاهی حاضر، کار تحقیقاتی بر روی چند نوع مصالح دانه‌ای دیگر را شامل ماسهٔ متراکم، مجموعهٔ گوی‌های شیشه‌ای با قطر متوسط ۵/۵ میلی‌متر و ذرات Z_rO_2 که با زاویهٔ بستر ۳۰ درجه توسط گو و ژو [3] انجام شده تأیید می‌کند. مقایسهٔ نتیجه‌ها در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با دقت

بیشتر در این شکل یک نکتهٔ مهم قابل بیان است و آن این که عرض بحرانی دریچه برای مجموعهٔ سنگریزه در پژوهش حاضر هم نسبت به گوی‌های پلاستیکی با دو آرایش و هم درمقایسه با مصالح مورد استفاده در مطالعهٔ گو و ژو [3] بزرگ‌تر است. علت احتمالی این موضوع، بزرگ‌تر بودن چگالی (ρ) مجموعه سنگریزه نسبت به سایر مصالح مورد بررسی است که تأثیر خود را این‌گونه بروز داده است.

براساس مطالب بیان‌شده، می‌توان دو کاربری برای پدیدهٔ قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای تعریف نمود. با بهره‌گیری از پدیدهٔ قوس‌زدگی به‌عنوان یک «عامل مثبت» در انتقال بار، می‌توان باتوجه به عرض حفره‌ای که قرار است در مصالح دانه‌ای ایجاد گردد، ابعاد ایمن آن را بدون نیاز به حایل‌بندی در شرایط برقراری کرنش مستوی محاسبه نمود. به‌عنوان مثال، می‌توان ابعاد مربوط به محل عبور یک سازهٔ مدفون نظیر یک لوله یا تونل بدون حایل در خاک ماسه‌ای را محاسبه نمود. از سوی دیگر، می‌توان شرایطی را ایجاد کرد تا از بروز پدیدهٔ قوس‌زدگی به‌عنوان یک «عامل مزاحم» در ایجاد قوس پایدار بر روی خروجی مصالح جلوگیری شود. بارها مشاهده شده است که در اثر ایجاد قوس‌زدگی در ذرات موجود در مخازن نگهداری مصالح نظیر سیلوها و قیف‌ها، فرایند تخلیهٔ آنها از محل خروجی متوقف می‌شود و با مشکل روبه‌رو می‌گردد. بنابراین، باید شرایطی را فراهم آورد تا مصالح امکان تشکیل قوس پایدار بر روی محل خروجی را نداشته باشند. با توجه به مطالب بیان شده در این بخش، اگر عرض خروجی مصالح، اندکی بزرگ‌تر از عرض بحرانی دریچه انتخاب شود، به‌هیچ‌وجه قوس‌زدگی ایجاد نخواهد شد و ذرات مخزن بدون بروز مشکل تخلیه می‌گردند. از این‌رو، می‌توان برای کاربرد عملی مفهوم عرض بحرانی دریچه به طراحی ابعاد دهانهٔ خروجی مخزن سازه‌هایی مانند سیلوها و قیف‌های ذخیره‌کنندهٔ مصالح دانه‌ای نظیر مخازن نگهداری غلات و مواد غذایی با ماهیت غیرچسبنده نظیر دانه‌های گندم یا جو اشاره نمود. بررسی نتایج به‌دست آمده پیرامون وقایع مرتبط با آستانهٔ انهدام قوس پایدار نشان می‌دهد که نتایج حاصل از گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل و متراکم به‌عنوان مدلی برای شبیه‌سازی ذرات تشکیل‌دهندهٔ یک محیط دانه‌ای دررابطه با شناخت اثر قوس‌زدگی در آستانهٔ انهدام قوس پایدار قابل اعتماد هستند.

پس از انهدام قوس پایدار

هدف از بررسی وضعیت مصالح دانه‌ای پس از انهدام قوس‌زدگی، تحلیل رفتار اجزای محیط و احتمالا یافتن سازوکارهای جدید دررابطه با مکانیک محیط‌های گسسته است. همان‌طور که پیشتر بیان گردید، اگر دریچه بیشتر از عرض حداکثر یا همان عرض بحرانی دریچه باز شود، به‌هیچ‌وجه قوس پایدار در محیط ایجاد نمی‌گردد و مصالح دانه‌ای تا جایی که امکان دارد از محل دریچه خارج می‌شوند و به درون مخزن تحتانی سقوط می‌کنند. درواقع این لحظه، پایان قوس‌زدگی در محیط دانه‌ای را تداعی می‌کند. اما این نکته که حد تخلیهٔ مصالح دانه‌ای تا کجا ادامه می‌یابد، موضوعی است که در این بخش به آن پرداخته می‌شود.

وضعیت مصالح تخلیه‌شده. پیش از انهدام قوس پایدار و همچنین در آستانهٔ آن، مطابق شکل (١٦)، حجم مصالح تخلیه‌شده که در مخزن تحتانی سقوط می‌کنند، برابر است با مجموع حجم واقع در فضای خالی سطح زیر قوس تشکیل‌شده تا تراز بالایی دریچه (y=0)، به‌اضافهٔ حجمی که در اثر نشست سطح فوقانی مصالح دانه‌ای ایجاد می‌شود. رابطهٔ (٢) این تعادل حجم را بیان می‌نماید:

$$V_d = V_s + V_a \qquad (٢)$$

V_d: حجم مصالح تخلیه‌شده در مخزن تحتانی.

V_s: حجم فضای خالی ناشی از نشست سطح فوقانی مصالح.

V_a: حجم فضای خالی محدود به قوس پایدار و تراز بالایی دریچه.

با تشکیل قوس پایدار، تخلیهٔ مصالح دانه‌ای از

دریچه متوقف می‌شود و این تعادل حجم برقرار می‌گردد، اما پس از انهدام قوس، مطابق شکل (۱۷)، حجم مصالح درون مخزن تحتانی از رابطهٔ (۳) قابل محاسبه است:

$$V_d = V_t - (V_{r(1)} + V_{r(2)}) \tag{۳}$$

در این رابطه:

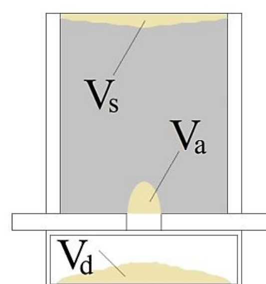
V_d: حجم مصالح تخلیه‌شده در مخزن تحتانی.

V_t: حجم کل مصالح درون جعبهٔ آزمایش پیش از انجام آزمون.

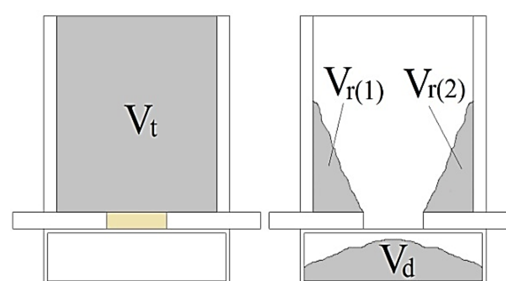
$V_{r(1)}$: حجم مصالح باقی‌مانده در جعبهٔ آزمایش، واقع در سمت چپ دریچه.

$V_{r(2)}$: حجم مصالح باقی‌مانده در جعبهٔ آزمایش، واقع در سمت راست دریچه.

باتوجه به حجم مصالح تخلیه‌شده در هر گام آزمایش می‌توان به تحلیل فشار استاتیکی اعمالی به قوس ناشی از مصالح موجود در جعبه و سازوکار انتقال بار حاصل از پدیدهٔ قوس‌زدگی پرداخت.



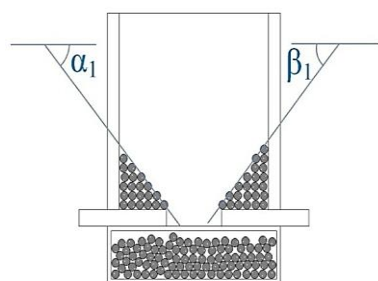
شکل ۱٦ محاسبهٔ حجم مصالح تخلیه‌شده در هر گام آزمون پیش از انهدام قوس پایدار



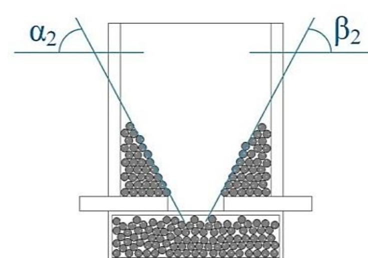
شکل ۱۷ محاسبه حجم مصالح تخلیه‌شده در هر گام آزمون پس از انهدام قوس پایدار

وضعیت مصالح باقی‌مانده در جعبه. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که پس از انهدام قوس پایدار، مصالح دانه‌ای باقی‌مانده درون جعبهٔ آزمایش تقریبا به‌صورت متقارن بر روی دو ریل افقی طرفین دریچه قرار می‌گیرند. به‌عنوان نمونه به شکل (۱۸) مراجعه شود. از مجموع شکل (۱٦) و (۱۸) می‌توان نتیجه گرفت که: $V_{r(1)} \approx V_{r(2)}$

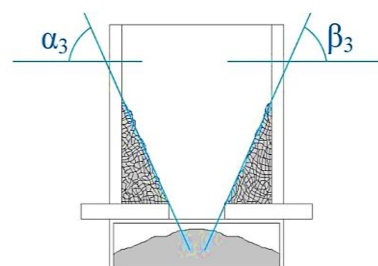
نکتهٔ قابل توجه دیگر آن است که آرایش هر یک از این توده‌ها، با تقریب بسیار خوبی نسبت به آرایش اولیه، ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. بنابراین می‌توان هر یک از آنها را «تودهٔ ایستای مصالح» نامید. شکل (۱۹) زاویهٔ راستای مرز خارجی تودهٔ ایستای مصالح باقی‌مانده نسبت به افق را به‌صورت شماتیک نمایش داده است. در این شکل، α_i زاویهٔ شیب تودهٔ مصالح واقع بر روی ریل سمت چپ نسبت به افق و β_i زاویه شیب توده مصالح بر روی ریل سمت راست دریچه نسبت به افق است. به‌عبارت دیگر، در شکل (۱۹)، شش زاویه شامل زاویهٔ شیب مرز تودهٔ ایستای گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل (α_1)، آرایش متراکم (α_2) و مجموعهٔ سنگریزه (α_3) واقع بر روی ریل سمت چپ نسبت به افق و زاویه شیب مرز تودهٔ ایستای گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل (β_1)، آرایش متراکم (β_2) و مجموعهٔ سنگریزه (β_3) واقع بر روی ریل سمت چپ نسبت به افق قابل رؤیت هستند.



الف) گوی‌های پلاستیکی با آرایش شل



ب) گوی‌های پلاستیکی با آرایش متراکم



پ) مجموعهٔ سنگریزه

شکل ۱۹ نمایش شماتیک زاویهٔ توده‌های ایستا نسبت به افق

جدول ۱ مقادیر زاویهٔ تودهٔ ایستای مصالح دانه‌ای نسبت به افق به‌ازای زاویه‌های بستر

	Beads (Loose)		Beads (Dense)		Rockfills	
θ (deg)	α_1	β_1	α_2	β_2	α_3	β_3
10	51	50	54	55	56	55
20	55	55	61	61	-	-
30	60	61	63	62	-	-
40	62	61	66	66	68	68
45	63	63	67	67	-	-
50	64	65	68	69	-	-
60	66	66	70	70	-	-
70	68	69	71	72	74	75
80	69	69	73	73	-	-
90	70	70	74	75	77	77

توجه ۱: واحد تمامی اعداد جدول درجه است.

توجه ۲: اعشار اعداد رو به بالا گرد شده‌اند.

توجه ۳: برای مجموعهٔ سنگریزه‌ها آزمون فقط بر روی زوایای بستر ۱۰، ٤۰، ۷۰ و ۹۰ درجه انجام شده است.

اندازه‌گیری زوایای تشکیل‌شده نشان می‌دهد که با افزایش شتاب ثقل مؤثر بر محیط ناشی از افزایش زاویهٔ بستر اصلی (θ)، زاویهٔ تودهٔ ایستای مصالح نسبت به افق (α_i و β_i) افزایش یافته است. جدول (۱) اندازهٔ زاویهٔ تودهٔ ایستا نسبت به افق را برای مصالح دانه‌ای آزمایش نشان می‌دهد. مطابق این جدول، مشاهده می‌شود که در هر محیط، مقادیر هر دو زاویه به‌ازای یک زاویهٔ بستر اصلی معین، با تقریب بسیار خوبی با یکدیگر برابر هستند. به‌عبارت دیگر، برای هر محیط دانه‌ای به‌ازای یک زاویهٔ بستر معین مشاهده شده است که:

$$\alpha_i \approx \beta_i \qquad i = 1, 2, 3$$

به‌منظور سادگی، می‌توان به‌جای بررسی زوج (α_i, β_i)، میانگین مقادیر α_i و β_i را محاسبه نمود و مطابق شکل (۲۰) در قالب پارامتر γ مورد مطالعه قرار داد. در شکل (۲۱) مقادیر اندازه‌گیری‌شده برای زاویهٔ تودهٔ ایستا نسبت به افق (γ) در مصالح دانه‌ای نشان داده شده‌اند. با برازش بهترین منحنی (Trendline) از میان داده‌های مربوط به مقادیر زاویهٔ تودهٔ ایستای قرائت‌شده در شکل (۲۱)، می‌توان به‌طور تجربی رابطهٔ (٤) را با $R^2 = 0.934$ استخراج نمود:

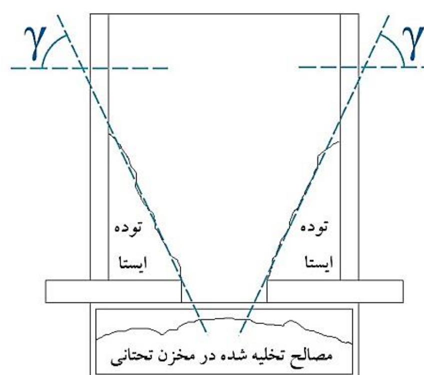
$$\gamma \approx \left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \cdot \left(\frac{\theta}{32.6}\right)^{0.14} \qquad (٤)$$

در این رابطه:

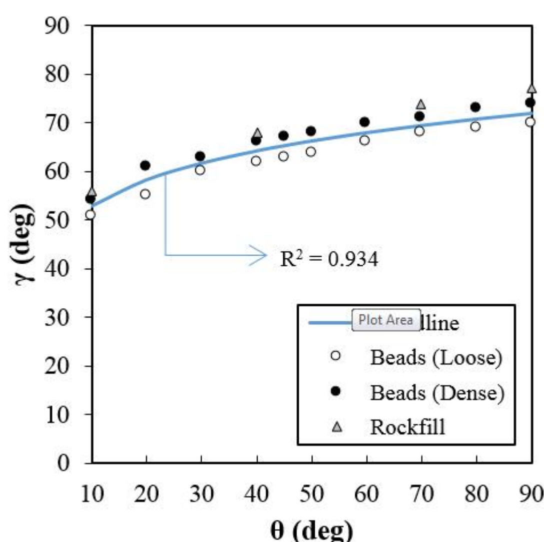
γ: زاویه توده ایستای مربوط به مصالح باقی‌مانده در جعبه نسبت به افق برحسب درجه.

ϕ: زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای برحسب درجه.

θ: زاویهٔ قرارگیری بستر اصلی دستگاه نسبت به افق برحسب درجه.

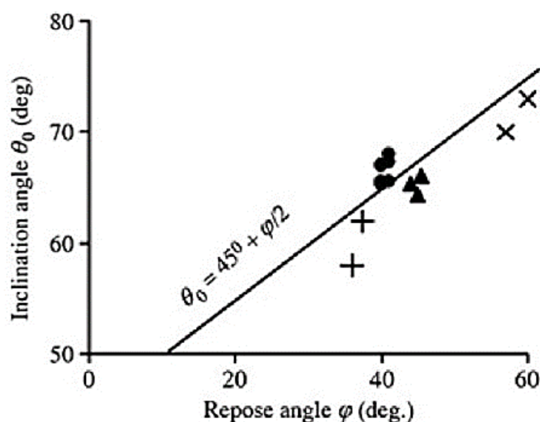


شکل ۲۰ راستای تودهٔ ایستا نسبت به افق برای یک محیط دانه‌ای



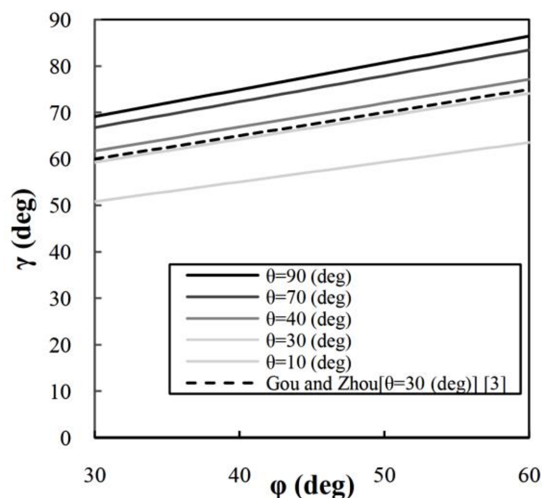
شکل ۲۱ مقادیر زاویهٔ تودهٔ ایستای مصالح به‌ازای زاویه‌های بستر

براساس رابطه (٤)، زاویهٔ γ تابع زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح و شتاب مؤثر بر محیط دانه‌ای است و راستای قرارگیری بخشی از محیط را نشان می‌دهد که در حین تخلیه‌شدن مصالح به درون دریچه، ذرات موجود در آن ناحیه بدون تغییر قابل توجه نسبت به وضعیت ابتدایی باقی می‌مانند. در مطالعهٔ گو و ژو [3]، پارامتری به نام زاویهٔ انحراف (Inclination angle) مرز تودهٔ ایستا (Stagnant mass) وجود دارد که مبین وضعیت قرارگیری مصالح در حین تخلیه‌شدن از دریچه می‌باشد و مطابق شکل (۲۲)، رابطه‌ای به‌صورت $\theta_0 = 45^\circ + \phi/2$ برای محاسبهٔ آن ارائه گردیده است. البته اندازه و شرایط بروز این زاویه فقط در شرایط وجود قوس‌زدگی بررسی شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که تودهٔ ایستا هم در شرایط وقوع قوس‌زدگی و هم پس از انهدام قوس پایدار، دارای زاویه‌ای برابر با مقدار به‌دست آمده از رابطهٔ (٤) است.



شکل ۲۲ رابطهٔ زاویهٔ انحراف تودهٔ ایستا [3]

برای صحت‌سنجی رابطهٔ (٤)، اگر مقدار ۳۰ درجه، یعنی زاویهٔ بستر دستگاه آزمون گو و ژو [3]، برای θ جایگزین شود، زاویهٔ تودهٔ ایستا نسبت به افق برحسب درجه برابر $0.9884(45^\circ + \phi/2)$ به‌دست می‌آید. به‌عبارت دیگر، می‌توان گفت که $\gamma_{(\theta=30\,degree)} \approx \theta_0$. این رابطه نشان می‌دهد که رابطهٔ (٤) با تقریب بسیار خوبی رابطهٔ زاویهٔ انحراف تودهٔ ایستا در کار گو و ژو [3] را تأیید می‌کند. البته با مراجعه به شکل (۲۳) که در آن، مقادیر زاویهٔ تودهٔ ایستا نسبت به افق به‌کمک رابطهٔ (٤) برای مصالح دانه‌ای با زاویهٔ اصطکاک داخلی در بازهٔ ۳۰ تا ٦۰ درجه قابل تخمین هستند، نیز صحت این ادعا اثبات می‌شود.



شکل ۲۳ تخمین مقدار زاویهٔ تودهٔ ایستا به‌ازای مقادیر زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح دانه‌ای در بازهٔ ۳۰ تا ۶۰ درجه

با این وجود، زاویهٔ تودهٔ ایستا می‌تواند به‌نوعی تداعی‌کنندهٔ زاویهٔ دیوارهٔ شیب‌دار تحتانی و منتهی به دهانهٔ خروجی سیلوها و قیف‌ها در حین جریان توده‌ای (mass flow) یا جریان قیفی (funnel flow) باشد (به مرجع [۱۷] مراجعه شود). مفهوم این یافته آن است که وضعیت قسمتی از مصالح دانه‌ای در دو طرف دریچه که می‌توان همهٔ آنها را «تودهٔ ایستا» نام‌گذاری نمود، در زمان‌های متفاوت انجام آزمایش، یعنی حین تخلیهٔ مصالح دانه‌ای، در لحظهٔ تشکیل قوس پایدار و همچنین پس از انهدام قوس، ثابت است و مقدار زاویهٔ راستای مرز هر یک از آنها نسبت به افق از رابطهٔ (٤) تبعیت می‌کند. درواقع، هر یک از این توده‌های ایستا مناطقی هستند که هر کدام به‌عنوان یک سطح لغزش برای لغزیدن مصالح دانه‌ای متأثر از باز شدن دریچه به‌کار می‌روند. به‌عبارت دیگر، این سطوح لغزشی مرز بین تودهٔ ایستا و تودهٔ مصالح دانه‌ای در حال تسلیم تحت تأثیر قوس‌زدگی هستند. بنابراین می‌توان اینچنین نتیجه گرفت که تودهٔ ایستا منطقه‌ای از مصالح دانه‌ای است که پدیدهٔ قوس‌زدگی هیچ‌گونه تأثیری بر وضعیت آن ندارد. هماهنگی خوب موجود بین نتایج حاصل از گوی‌های پلاستیکی با سنگریزه‌ها حاکی از آن است که در رابطه با قوس‌زدگی پس از انهدام قوس پایدار نیز، گوی‌های پلاستیکی در هر دو آرایش به‌خوبی رفتار اجزای یک محیط دانه‌ای واقعی را مدل‌سازی نموده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده در این بخش، مفاهیم جدیدی در بحث مکانیک یک محیط دانه‌ای با ماهیت اجزای مجزا ارائه نمود که می‌تواند پایه‌گذار شناخت بیشتر رفتار مصالح دانه‌ای گردد.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از مشاهدات آزمایشگاهی دررابطه با اثر قوس‌زدگی در دو حالت زمانی متمایز قابل بیان هستند:

الف) در آستانهٔ انهدام قوس و پایان قوس‌زدگی؛ برای هر یک از مصالح و به‌ازای هر زاویهٔ بستر اصلی دستگاه نسبت به افق، به آخرین قوس پایدار ایجادشده بر روی دریچه‌ای با حداکثر عرض ممکن، قوس بحرانی گفته می‌شود. حداکثر عرض ممکن برای باز شدن دریچه برحسب زاویهٔ اصطکاک داخلی و زاویهٔ بستر مصالح دانه‌ای، حدودا ٤/٧ تا ٨/٦٧ برابر قطر متوسط ذرات محیط، مشاهده شده است. به بیان دیگر، درصورتی که عرض دریچه از این حد بیشتر شود، دیگر هیچ‌گونه قوسی تشکیل نخواهد شد. از این‌رو، قوس بحرانی ظرفیت نهایی پدیدهٔ قوس‌زدگی را برای انتقال فشار استاتیکی از مصالح دانه‌ای اطراف قوس به دو تکیه‌گاه آن نشان می‌دهد. همچنین، مشاهدات صورت‌گرفته حاکی از آن هستند که گرچه عرض دریچه و عرض قوس متناظر با قوس بحرانی دارای مقادیر بیشینهٔ ممکن هستند، اما ارتفاع قوس بحرانی نسبت به گام پیشین، نه‌تنها روند افزایش خود را ادامه نمی‌دهد، بلکه در کلیهٔ گام‌ها کاهش یافته است.

ب) پس از انهدام قوس؛ بخشی از ذرات محیط پس از

فروپاشی آخـرین قـوس پایـدار، درون مخـزن تحتـانی تخلیه می‌شوند. اما قسمتی از مصالح دانه‌ای درون جعبه باقی می‌مانند که تقریبـا بـه‌صـورت متقـارن در روی دو ریل افقی طرفین دریچه قرار می‌گیرند. آرایش هـر یـک از توده‌های باقی‌مانده در طرفین دریچه، با تقریب بسیار خوبی نسبت به آرایش اولیـه پـیش از انجـام آزمـایش، ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. در زمان‌هـای متفـاوت انجام آزمایش، یعنـی حـین تخلیـهٔ مصـالح دانـه‌ای، در لحظهٔ تشکیل قـوس پایـدار و همچنـین پـس از انهـدام قوس، وضعیت «تودهٔ ایستا» ثابت و مقدار راسـتای مـرز آن نسبت به افق قابل محاسـبه اسـت. تـوده‌هـای ایسـتا مناطقی هستند که هر کدام به‌عنوان یـک سـطح لغـزش برای لغزیدن مصالح دانه‌ای متـأثر از بـاز شـدن دریچـه به‌کار می‌روند. این سطوح لغزشی مرز بین تودهٔ ایسـتا و تودهٔ مصالح دانـه‌ای در حـال جابـه‌جـایی رو بـه پـایین هستند. به‌عبارت دیگر، تودهٔ ایسـتا منطقـه‌ای از مصـالح دانه‌ای است که پدیدهٔ قوس‌زدگی هیچ‌گونه تـأثیری بـر وضعیت آن ندارد.

مراجع

1. Pugnaloni, L.A. and Barker, G.C., "Structure and Distribution of Arches in Shaken Hard Sphere Deposits", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 337, No.3, pp. 428-442, (2004)
2. Michalowski, R.L. and Park, N., “Arching in granular soils”, *First Japan-U.S. Workshop on Testing, Modeling, and Simulation*, Boston, Massachusetts, United States, (2005).
3. Guo, P. and Zhou, S., "Arch in Granular Materials as a Free Surface Problem", *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics*,Vol. 37, No. 9, pp. 1048-1065, (2012).
4. Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A, Lodder, H.J. van Tol, A.F., "Model Experiments on Piled Embankments, Part I”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 32, pp. 69-81, (2012).

۵. احمدی، ع.، سیدی حسینی‌نیا، ا، «بررسی آزمایشگاهی اثر قوس زدگی در مصالح دانه ای به ک مک د ستگاه تو سعه یاف ته دری چه»، *ن شریهٔ مهندسی عمران فردوسی مشهد*، دوره ۲۷، شماره صفحه: ۱۷-۳۰، (۱۳۹۵).

6. Shelke, A., and Mishra. S., "Uplift Capacity of Single Bent Pile and Pile Group Considering Arching Effects in Sand", *Geotechical and Geological Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 337–347, (2010).
7. Jiang, Y.J. and Towhata. I., "Experimental Study of Dry Granular Flow and Impact Behavior Against a Rigid Retaining Wall", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 46, No. 4., pp. 1-17, (2012).
8. Qiu, G. and Grabe, J."Active Earth pressure shielding in quay wall constructions: numerical modeling”. *Acta Geotechnica*, Vol. 7, No. 4, pp. 343-355, (2012).
9. Lee, J. and Eun, J., "Estimation of Bearing Capacity for Multiple Footings in Sand”, *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, No. 6, pp. 1000-1008, (2009).
10. Zhang, Z.X., Zhang, H. and Yan, J.Y., "A Case Study on the Behavior of Shield Tunneling in Sandy Cobble Ground", *Environmental Earth Sciences*, Vol. 69, No. 6, pp. 1-10, (2012).

11. Chen, R. P., Li, J., Kong, L.G, Tang, L., "Experimental Study on Face Instability of Shield Tunnel in Sand", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 33, pp. 12-21, (2013).
12. Zhang, N., He, M. and Liu, P., "Water Vapor Sorption and its Mechanical Effect on Clay-bearing Conglomerate Selected from China", *Engineering Geology*, Vol. 141–142, pp. 1-8, (2012).
13. Zhang, L., Zhao, M. H. and He, W., "Working Mechanism of Two-direction Reinforced Composite Foundation", *Journal of Central South University of Technology,* Vol. 14, No. 4, pp. 589-594, (2007).
14. Li, S.J., Chen, J. and Feng, X.T., "Analytic Solution to Soil Arching Effect and its Application Based on Interaction of Slope Soil and Piles", *Materials Research Innovations*, Vol. 15, No. 1, pp. 578-581, (2011).
15. Deb, K., "A Mathematical Model to Study the Soil Arching Effect in Stone Column-supported Embankment Resting on Soft Foundation Soil", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, No. 12, pp. 3871-3883, (2010).
16. Tien , H. J., "A Literature Study of the Arching Effect", Msc thesis, *Massachusetts Institute of Technology*, (1996).

۱۷. احمدی، ع.، «بررسی آزمایشگاهی پدیدهٔ قوس‌زدگی در مصالح دانه‌ای به‌کمک دستگاه توسعه‌یافتهٔ دریچه»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۹۲).

18. Rao, K.K. and Nott, P.R., "An Introduction to Granular Fow”, *Cambridge University Press*, (2008).